

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra Mechanické technologie

Rozbor svařitelnosti oceli P91

Weldability Analysis of Steel P91

Student: Ondřej Palička

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.

Ostrava 2009

Zadání bakalářské práce

Student: **Ondřej Palička**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Specializace: 70 Strojírenská technologie
Téma: **Rozbor svařitelnosti oceli P91**
Weldability Analysis of Steel P91

Zásady pro vypracování:

1. Charakterizujte ocel P91.
2. Navrhněte možné způsoby svařování oceli P91 pro energetické strojírenství.
3. Proved'te literární rešerši svarových spojů z oceli P91 používaných v energetickém strojírenství.
4. Navrhněte metodiku zkoušení svarových spojů.
5. Proved'te diskuzi.

Seznam doporučené odborné literatury:

Koukal, J., Zmydlený, T. Svařování. VŠB-TU Ostrava, 2005.
Turňa, M. Speciálne metódy zvarovania. ALFA, Bratislava, 1989.
Kolektiv autorů Technologie svařování a zařízení. ZEROSS, Ostrava, 2001.
Kolektiv autorů Materiály a jejich svařitelnost. ZEROSS, Ostrava, 1999.
Časopisy Zváranie, Welding Journal

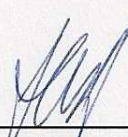
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

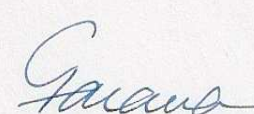
Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.**

Datum zadání: 29.09.2008

Datum odevzdání: 22.05.2009




prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího ročníkového projektu a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 22. 5. 2009

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- Byl jsem seznámen s tím, že na můj ročníkový projekt se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě ročníkový projekt užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk ročníkového projektu bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího ročníkového projektu. Souhlasím s tím, že údaje o ročníkovém projektu budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – ročníkový projekt nebo poskytnou licenci k jejímu využití mohou jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 22. 5. 2009

.....

Palička Ondřej

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc. za trpělivost, podnětné rady a odborné vedení při zpracování bakalářské práce.

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Palička Ondřej. *Rozbor svařitelnosti oceli P91*. Vedoucí práce doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc. Bakalářská práce. Ostrava: katedra Mechanické technologie, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009. 42s.

Bakalářská práce je zaměřena na rozbor svařitelnosti oceli P91. V úvodní části práce jsem se zaměřil na charakteristiku oceli P91. Následuje vlastní návrh dvou svařovacích metod, kterými budou svařovány dvě části používané v energetickém strojírenství, parovodní trubka a přehřívák. Dále následuje metodika zkoušení svarových spojů dle výsledků náchylnosti na jednotlivé trhliny, především mechanické zkoušky a creepová odolnost.

ANNOTATION OF BACHELOR'S WORK

Palička Ondřej. *Weldability Analysis of Steel P91*. Leader of work doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc. Grade project. Ostrava: Department of mechanical technology, Faculty of civil engineering VŠB – TU Ostrava, 2009. 42s.

Batchelor work is analysis of weldability steel No.P91. The project begins by description of steel No.P91. On the base of description will be proposed two procedures of welding for welding two finds used in power (energy) industry – steam pipe and overheater. The next step will be proposed methodic (procedure) of weld testing per tests results for cracks, mechanical tests and creep stability.

OBSAH:

Seznam použitého značení.....	8
1. Úvod.....	9
2. Charakteristika 9÷12% Cr (P91).....	10
2.1 Vliv prvků na mikrostrukturu a vlastnosti oceli 9÷12% Cr (P91).....	13
3. Svařitelnost oceli P91.....	16
3.1 Vliv chemického složení na svařitelnost materiálu.....	17
3.2 Metody pro svařování oceli P91.....	21
3.2.1 Metoda 111.....	21
3.2.2 Metoda 141.....	22
3.3 Tvary a rozměry svarových ploch.....	24
3.4 Volba přídatného materiálu.....	24
3.4.1 Přídatný materiál pro metodu 111.....	25
3.4.2 Přídatný materiál pro metodu 141.....	27
3.5 Výpočet přehřevu.....	29
3.5.1 Výpočet přehřevu podle Seferiana.....	30
3.5.2 Výpočet přehřevu podle Ita a Bessya.....	30
3.5.3 Výpočet přehřevu podle ČSN EN 1011-2.....	31
3.5.4 Porovnání přehřevů.....	31
4. Metodika ověřování vlastností svarových kovů.....	32
4.1 Nedestruktivní zkoušky.....	32
4.1.1 Vizuální prohlídka.....	32
4.1.2 Kapilární zkouška.....	32
4.1.3 Magnetické a magnetoinduktivní zkoušky.....	33
4.1.4 Ultrazvukové zkoušení svarů.....	34
4.1.5 Zkoušky prozařování.....	34
4.2 Destruktivní zkoušky.....	35
4.2.1 Podélná zkouška tahem.....	35
4.2.2 Zkouška rázem v ohybu.....	36
4.2.3 Zkouška praskavosti TEKKEN.....	36
4.2.4 Makroskopická kontrola svarových spojů.....	37
4.2.5 Mikroskopická kontrola svarových spojů.....	37
4.2.6 Zkouška tvrdosti dle Vickerse.....	38
4.3.7 Creepová odolnost.....	38
5. Závěr.....	39
6. Použitá literatura.....	40

Seznam použitého značení

C_E	uhlíkový ekvivalent	[%]
α	ferit	[1]
γ	austenit	[1]
δ	delta ferit	[1]
I	svařovací proud	[A]
U	napětí na oblouku	[V]
HD	difuzní vodík	[ml/g]
I_Z	základní proud	[A]
I_p	impulsní proud	[A]
HV	tvrdost podle Vickerse	[1]
d	průměr	[mm]
R_e	mez kluzu	[MPa]
R_m	mez pevnosti	[MPa]
A_5	tažnost	[%]
l	délka elektrody	[mm]
T	doba hoření elektrody	[s]
F	síla	[N]
t	tloušťka materiálu	[mm]
β	úhel úkosu	[°]
$R_{p0,2}$	mez kluzu za zvýšených teplot	[MPa]
Z	kontrakce	[%]
111	ruční obloukové svařování obalenou elektrodou	[1]
121	svařování pod tavidlem drátovou nebo plněnou elektrodou	[1]
131	svařování tavící se elektrodou v atmosféře inertního plynu	[1]
141	svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu	[1]

1. ÚVOD

Svařitelnost kovů je v dnešní době důležitá nejen pro odborníky v materiálové oblasti, ale i technology. Je to nerozebiratelné spojení s dobrými mechanickými vlastnostmi. Velký význam má použití výpočetních metod a následné ověření na reálném svarovém spoji.

K ověření vypočtených hodnot nám poslouží celá řada metod na provedení zkoušek na svarovém spoji a následné zjištění jeho vlastností mechanických, chemických, mikrostruktur nebo makrostruktur.

Vývoj jde vpřed díky vývoji nových metod zkoušení svarových spojů, ale také nových svařovacích metod, nových používaných materiálů, novým technologiím ale také výpočetní technice.

Tato bakalářská práce se zabývá svařitelností oceli P91 v energetickém strojírenství. Obsahuje charakteristiku oceli P91 na jejímž základě jsou zvoleny svařovací metody, parametry nastavení svařovacího stroje a přídavný materiál. Podle složení oceli dále návrh metodiky zkoušení svarových spojů.

Cílem této bakalářské práce je zvolení přídavných materiálů pro svařování dle ČSN, pro dané svařovací metody (111, 141). Dále u dvou svařovaných částí (parovodní trubka, přehřívač) návrh tvarů a rozměrů svarových ploch a výpočet přehřevů. A následně dosažené výsledky zpracovat a vyhodnotit.

2. Charakteristika 9-12%Cr (P91)

Základními žárupevnými materiály jsou slitiny oceli pro použití za zvýšené teploty. Tyto oceli pracují v podmínkách tečení. Od určité teploty nejsou oceli schopny plnit požadavky na žárupevnost, proto se používají superslitiny Fe, Co a Ni. Žárupevné oceli a slitiny se používají hlavně v energetickém strojírenství, tj. parovodní a přehřívákové potrubí a dalších armatur a kotlů. Základním požadavkem na tyto materiály je zachování jejich mechanických vlastností a to i za zvýšené teploty. Požadavky na žárupevné oceli jsou podle [2, 3] např.:

- vysoká dlouhodobá pevnost při tečení,
- vysoká mez kluzu a pevnost v tahu,
- dobrá tvařitelnost, tažnost a odolnost proti křehkému porušení,
- vysoká odolnost proti tepelné a tepelně-mechanické únavě,
- stabilita struktury a vlastností, nízká náchylnost k poklesu zpevnění, tak i k nárůstu zpevnění a provozní křehkosti,
- výhodné fyzikální vlastnosti – vysoký součinitel tepelné vodivosti a nízký součinitel tepelné roztažnosti,
- dobrá žáruvzdornost a odolnost proti korozi v prostředí spalín a vodní páry,
- dobré technologické vlastnosti – vhodnost k tváření a svařitelnost,
- poměrně nízká cena.

Podle současného stavu znalostí vývoje je možné rozdělit žárupevné oceli do několika skupin [2, 3÷6]:

- slitiny neželezných kovů – hliníku a titanu, pro použití v rozmezí teplot $200 \div 600^{\circ}\text{C}$,
- uhlíkové oceli feriticko-perlitické a nízkolegované a feriticko-bainitické s přídavkem Cr, Mo, Ni, Ti, B, používané v normalizovaném stavu a v rozmezí teplot přibližně do 400°C (pod mezní teplotou),
- žárupevné nízkolegované oceli s obsahem Cr, Mo, V, Ti, Nb, W, používané ve stavu normalizovaném nebo tepelně zušlechtěném, a střednělegované oceli se středním obsahem uhlíku typu Cr-Mo-V nebo Ni-Cr-Mo-V, používané na výkovky dílců turbín, hřídele rotorů a další upevňující prvky energetických zařízení. Používají se obvykle při teplotách do $500 \div 580^{\circ}\text{C}$.
- martenzitické oceli a ocelolitiny typu $9 \div 12\%\text{Cr}$ používané ve stavu tepelně zušlechtěném, obsahující prvky Mo a V a navíc W, Nb, N a B. Tyto oceli jsou určeny pro práci za standardních podmínek provozu, tj. při teplotách do 600°C , v blocích s nadkritickými parametry, tj. do 620°C při tlaku do 30MPa,
- austenitické Cr-Ni oceli a ocelolitiny s přídavkem legujících prvků: Mo, Ti, Nb, V, W, Ta, Zr, B, N, Cu, Al, s proměnlivým chemickým složením. Používají se v rozmezí teplot do 650°C ,
- vysokolegované žárupevné oceli pro speciální účely, oceli na ventily,
- žárupevné vícesložkové slitiny na bázi niklu a kobaltu, včetně nových generací slitin,
- materiály na bázi intermetalických fází (TiAl , Ti_3Al , NiAl),
- slitiny obtížně tavitelných kovů, hlavně W, Ta, Mo a Nb.

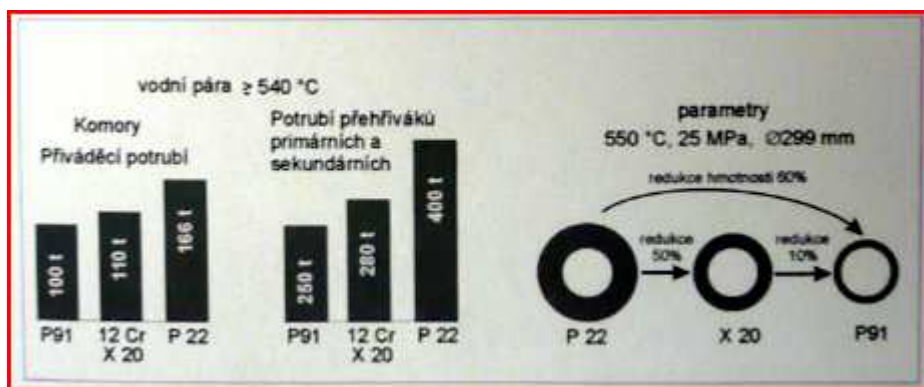
U žárupevných ocelí je třeba věnovat pozornost stopovým prvkům, které zhoršují mechanické vlastnosti. Mezi škodlivé prvky snižující vlastnosti žárupevných ocelí patří cín, olovo, vizmut, antimon, fosfor, síra, kyslík a vodík.

S rozvojem tepelné energetiky je svázán i rozvoj žárupevných ocelí. Jde o zvýšení účinnosti zařízení. Vývoj materiálu po stránce složení je přidáním 1-2% wolframu a mikrolegur Nb, B a N. Velká pozornost se věnuje feritickým ocelím na bázi 9÷12 %Cr. Základním představitelem 9%Cr ocelí je žárupevná ocel P91, podle DIN označení X10CrMoVNb 91, v ČR 17 119. Tato ocel má dobrou svařitelnost, tvařitelnost za tepla, slévárenské vlastnosti, odolnost proti oxidaci v prostředí páry.

Podle literatury [3] byly vývojové práce zaměřeny na splnění požadavků:

- lomová tažnost při creepu a houževnatosti by měli být ekvivalentní nebo lepší než u klasických nízkolegovaných 1CrMoV ocelí,
- dobrá tvařitelnost za tepla,
- dobré slévárenské vlastnosti oceli,
- dobrá svařitelnost,
- dobrá odolnost proti oxidaci v prostředí páry.

Podle literatury [6] Ocel P91 umožňuje značné ztenčení stěn potrubí ve srovnání s ocelí P22. Dochází k úsporám na materiálu a snížení hmotnosti.



Obr. 1: Tloušťka stěny v závislosti na použité oceli [6]

Tabulka č.1: Chemické složení oceli P91, vč. Dovolných úchylek podle normy VN 417 119 [hnot.%]

Chemické složení oceli P91 podle normy VN 417 119			
--	--	--	--

C	Mn	Si	P	S	Ni
0,08÷0,12	0,30÷0,60	0,20÷0,50	max. 0,020	max. 0,010	max. 0,40
+0,01	+0,10	+0,10			
-0,00	-0,00	-0,00			
Cr	Mo	V	Nb	N	Al
8,00÷9,50	0,85÷1,05	0,18÷0,25	0,06÷0,10	0,030÷0,070	max. 0,02
+0,05	+0,05		+0,02	+0,005	
-0,05	-0,05		-0,00	-0,000	

Tabulka č.2: Mechanické vlastnosti oceli P91 při 20°C

[4, 8, 9]

Mez kluzu	R _{p0,2}	[MPa]	579
Pevnost v tahu	R _m	[MPa]	731
Tažnost	A ₅	[%]	20
Kontrakce	Z	[%]	73
Tvrdost	HV 10	[-]	221

2.1 Vliv prvků na mikrostrukturu a vlastnosti oceli 9÷12% Cr

Uhlík a dusík

Obsah uhlíku se v moderních ocelích pohybuje v rozmezí 0,08 ÷ 0,20 hm.% [15]. Zvyšující se obsah uhlíku degraduje technologické vlastnosti těchto ocelí, především svařitelnost a tvažitelnost [16, 15]. Rovněž s rostoucím obsahem uhlíku klesají teploty rozpadu austenitu M_s a M_{fs} , což v případě rozměrných výrobků vede ke stabilizaci významného množství zbytkového austenitu v martenzitické matici.

Dusík ovlivňuje velmi pozitivně žárupevné vlastnosti 9 ÷ 12% Cr ocelí. Obsahy dusíku se pohybují v rozmezí 0,004 ÷ 0,08 hm.%. Další zvyšování obsahu dusíku má za následek degradaci creepových vlastností ocelí [15]. Pro ocel s přísadou bóru bývají obsahy dusíku nižší než cca 0,02 hm.%, aby byla minimalizována tvorba nitridů bóru [17].

Chrom

Vysoké obsahy chromu zlepšují odolnost těchto ocelí vůči oxidaci, avšak negativně ovlivňují rozměrovou stabilitu karbidů $M_{23}C_6$, které mají vliv na žárupevnost ocelí [18]. V posledních dvaceti letech byly vyvinuty modifikované 9 %Cr oceli s vysokou žárupevností, ale jejich oxidační odolnost je v prostředí páry při teplotách $600 \div 650$ °C nedostatečná [19, 20]. V současné době jsou proto podle [32, 36] evropské vývojové práce zaměřeny především na oceli s obsahy $10 \div 12$ %Cr.

Molybden a wolfram

Jedná se o prvky, které mají větší atomový poloměr než atomy železa. Jejich přísada do ocelí proto umožňuje zvýšit úroveň zpevnění tuhého roztoku. Jejich celkový obsah v ocelích se vyjadřuje pomocí následujícího vztahu [21, 22]:

$$Mo_{ekv} = hm. \% Mo + 0,5(hm. \% W) \quad (3)$$

Při překročení meze rozpustnosti wolframu nebo molybdenu dochází k precipitaci částic Lavesovy fáze, případně fáze M_6X . Foldyna [23] uvádí, že nemá význam zvyšovat obsah těchto prvků nad hodnotu $Mo_{ekv} = 1$. Fujita [24] navrhuje optimální obsah těchto prvků na úrovni $Mo_{ekv} = 1,2 \div 1,5$.

Křemík

Křemík má menší atomy než železo a vyvolává zpevnění tuhého roztoku. Tento prvek má pozitivní vliv na odolnost těchto ocelí vůči oxidaci, ale negativně působí na chemickou heterogenitu ingotů a mikrostrukturní stabilitu ocelí. Obsahy křemíku v $9 \div 12$ %Cr ocelích jsou závislé na účelu použití těchto ocelí [25].

Hliník

Hliník má velmi negativní vliv na úroveň žárupevnosti modifikovaných $9 \div 12$ %Cr ocelí, především v kombinaci s přísadou dusíku [15, 25]. Hrubé částice AlN v průběhu popouštění precipitují na hranicích subzrn a tím nepříznivě ovlivňují nejen precipitační

zpevnění těchto ocelí, ale jsou také příčinou poklesu creepové plasticity [26, 27]. Aplikované výrobní technologie proto musí umožnit minimalizaci obsahu hliníku [28].

Vanad a niob

Modifikované 9 ÷ 12 %Cr oceli se legují přísadou vanadu pro dosažení účinného precipitačního zpevnění kovové matrice jemnými částicemi MX [15, 25, 29]. Intenzita precipitace vanadem bohatých částic MX závisí na obsahu dusíku v oceli, parametrech tepelného zpracování a creepové expozice [21]. Malá přísada niobu se používá především pro omezení růstu austenitického zrna v průběhu dlouhodobé výdrže na vysokých teplotách ohřevu během tepelného zpracování na jakost [15]. Niob tvoří částice NbX, kde X je C, N. Částice NbX se v průběhu austenitizace rozpouštějí pouze částečně, protože rovnovážná rozpustnost niobu v kovové matici je i při vysokých teplotách velmi malá [21].

Mangan, nikl, kobalt, měď

Tyto prvky jsou austenitotvorné a mohou být použity pro kompenzaci účinků feritotvorných prvků na složení ocelí. Obsah niklu je zpravidla v modifikovaných 9 ÷ 12 %Cr ocelích nízký, protože způsobuje snížení žárupevných vlastností [17]. Účinek přísady kobaltu nebo mědi na žárupevné vlastnosti a mikrostrukturní stabilitu moderních ocelí není ještě v současné době zcela jasný [15, 17]. Kobalt, na rozdíl od ostatních austenitotvorných prvků, zvyšuje teplotu M_s , jeho nevýhodou je však jeho cena. Obsah manganu bývá obvykle v 9 ÷ 12 %Cr ocelích nízký, protože tento prvek snižuje transformační teploty a negativně ovlivňuje úroveň chemické heterogenity ocelí [21].

Bór

Malé množství bóru v modifikovaných 9 ÷ 12 %Cr ocelích má velmi pozitivní vliv na úroveň žárupevných vlastností a na odolnost proti zkřehnutí [30, 31, 32]. Pro zajištění dobré úrovně houževnatosti, tvažitelnosti a svařitelnosti se doporučuje používat přísadu bóru pouze do cca 100ppm [33].

3. Svařitelnost oceli P91

Při svařování dochází k degradaci mechanických i žárupevných vlastností v důsledku rozdílu chemického složení základního materiálu a svarového kovu. Hlavně v TOO pak dochází ke změnám mechanických a žárupevných vlastností. Požadavkem při použití technologie svařování tyto nepříznivé jevy odstranit. Ocel P91 byla vyvíjena s ohledem na její svařitelnost. Význam má nízký obsah uhlíku, který je srovnatelný s obsahem ve svarovém kovu. Vznikající martenzit v průběhu svařování má nižší tvrdost. Proto se předpokládá nižší náchylnost ke studeným trhlinám.

Homogenní svarové spoje oceli P91

Jsou vyvíjeny přídatné materiály se snahou dosáhnout vysokých hodnot meze pevnosti při tečení a zároveň vyhovující úrovně vrubové houževnatosti svarového kovu po vyžehání svarového spoje. Legující prvky zlepšující žárupevné vlastnosti však snižují úroveň vrubové houževnatosti svarového kovu. TOO je kritická oblast svarového spoje pro musíme její šířku minimalizovat [34].

Heterogenní svarové spoje oceli P91

Jsou to svarové spoje spojující ocel P91 s jinou žárupevnou ocelí. Těmto spojům je věnována velká pozornost, zejména např. z hlediska řešení svařitelnosti, technologie svařování a mechanizace svařování spojů, ověření jejich žárupevných vlastností [35]. Podmínkou úspěšného nasazení heterodenních svarových spojů je aby jejich žárupevnost dosahovala žárupevnosti homogenních svarových spojů nízkolegovaných ocelí. [5]

3.1 Vliv chemického složení na svařitelnost materiálu

Uhlík

Uhlík, který je přítomen ve všech ocelích ovlivňuje rozhodujícím způsobem jejich svařitelnost. Ovlivňuje především mechanické vlastnosti ocelí. S rostoucím obsahem uhlíku rostou hodnoty R_m , R_e , HV oceli a snižují se její plastické vlastnosti vyjádřené hodnotami KCV , A_5 , a Z . S rostoucím obsahem uhlíku v oceli se zvyšují také hodnoty tvrdosti martenzitu, který vzniká ve svarech při velkých rychlostech ochlazování. Současně se snižují kritické rychlosti ochlazování pro vznik martenzitické struktury. Proto je jeho obsah ve svařitelných nelegovaných ocelích omezen na hodnotu 0,25 hm%, při které se ještě nepředpokládá vznik studených trhlin ve svarech. Při tomto obsahu uhlíku se dosáhne, při rychlostech ochlazování odpovídajících běžným obloukovým metodám svařování, v TOO svarového spoje 50% martenzitické struktury o tvrdosti 350 HV10. Proto byla tato hodnota tvrdosti stanovena jako maximální přípustná hodnota tvrdosti v tepelně nezpracovaných svarových spojích uhlíkových ocelí. Při svařování uhlíkových ocelí s obsahem uhlíku větším než 0,25 hm% je nutné předepsat předehřev, dohřev a tepelné zpracování pro zabránění vzniku studených trhlin [7].

Křemík

V nelegovaných uhlíkových ocelích zvyšuje pevnost feritu. Působí silně desoxidačně. Nedostatek křemíku vede k tomu, že ocel je neuklidněná (pod 0,1 hm% Si). Horní hranice je omezena hodnotou 0,45 hm% Si [7].

Mangan

Zvyšuje mez kluzu i mez pevnosti, aniž by byla do určitého obsahu snížena plasticita. Proto je možné dosáhnout ve svařitelných uhlíkových ocelích vyšších hodnot meze kluzu a meze pevnosti než odpovídá maximálnímu obsahu uhlíku 0,25%. Nelegované uhlíkové oceli obvykle obsahují 0,30 až 1,7 hm% manganu. Mangan působí jako desoxidační prvek a společně s křemíkem se používají k výrobě uklidněných celí. Síra se váže na mangan za tvorby MnS . Pomocí manganu se proto dá snížit obsah síry v oceli nebo ve svarovém kovu [7].

Fosfor

Zvyšuje mez kluzu i mez pevnosti a zvyšuje odolnost proti atmosférické korozi především ve spojení s mědí. Jeho přítomnost snižuje plasticitu oceli a způsobuje zkřehnutí za studena. V současnosti se proto u nelegovaných ocelí omezuje obsah fosforu na max. 0,04 hm.%. Jeho škodlivé působení lze shrnout následovně [7]:

- Zvyšuje sklon k segregaci tím, že prodlužuje dvoufázovou oblast v rozmezí teplot 1534 až 1050°C.
- Malá difúzní rychlost v α a γ tuhém roztoku (ferit, austenit) nedovoluje vyrovnání koncentrace fosforu.
- Způsobuje zkřehnutí tuhého roztoku α .
- Zkřehnutí feritu vede ke křehkým lomům, které lze prokázat prudkým snížením hodnot vrubové houževnatosti i za vyšších teplot [7].

Síra

Někdy se přidává úmyslně do nelegovaných konstrukčních ocelí za účelem zlepšení obrobitelnosti. Železo a sulfid železnatý tvoří nízkotavitelné eutektikum, jehož bod tavení se vlivem oxidu železnatého posouvá k ještě nižším teplotám. Kritická je široká oblast tuhnutí od bodu tavení železa při 1534°C až k bodu tavení Fe-FeS eutektika při 988°C. V tomto celém rozsahu teplot je γ tuhý roztok v rovnováze s tekutou fází, která může dosáhnout eutektické koncentrace kolem primárních zrn, až 31 hmotnostních procent síly. Proto při tváření za tepla a svařování dochází k natavení eutektika na hranicích zrn a tím nastane porušení materiálu. Tento jev je nazýván náchylností na vznik teplých likvančních trhlin. Při vysokém obsahu síry působí příznivě přítomnost manganu. Síra má k manganu větší afinitu než k železu a bod tavení sulfidu manganu leží podstatně výš (1610°C). Tzn., že sulfidy manganu při tuhnutí oceli jsou již v pevném stavu a působí jako krystalizační zárodky, které jsou rozděleny v zrnech oceli, tj. nenachází se na hranicích zrn. U nelegovaných ocelí má být v současné době max. obsah síry do 0,04 hm. %. Vysoký obsah síry je jednou z hlavních příčin vzniku lamelárních trhlin [7].

Dusík

V železe a jeho slitinách se vyskytuje vždy určitým množstvím závislým na technologii výroby. Maximální rozpustnost dusíku je při 1600°C 0,04 hm.%. Dusík je podobně jako uhlík austenitotvorný prvek a proto jeho přítomnost v uhlíkové oceli způsobuje rozšíření pole γ . Vznik nitridů má podstatný vliv na vlastnosti ocelí, neboť se zvyšuje mez kluzu, pevnosti a tvrdost. Současně se snižují plastické vlastnosti, zejména tažnost, vrubová houževnatost, příp. mez únavy. Praktickými projevy vylučování nitridů železa je stárnutí uhlíkových ocelí o křehkost v oblasti teplot 100 až 350°C. Zvláště je nebezpečné vylučování nitridů v úzkém pásmu v okolí svaru, které může vést při nižších teplotách k úplnému porušení konstrukce [7].

Vodík

Ve slitinách železa je vodík nežádoucí příměsí. Rozpouští se v nich při tavení a to jak při výrobě, tak i při svařování. Největší rozpustnost vodíku je v železe γ , která je větší než v železe α a δ . Mez rozpustnosti vodíku při 1530 °C je 28 cm³ ve 100 g železa. Vodík je v kovu buď rozpuštěn, nebo tvoří s kovy hydridy.

Vodík je příčinou vzniku následujících vad ve svarových spojích:

- pórovitost svarového kovu
- oduhličení svarového kovu
- vznik trhlin ve svarovém kovu a tepelně ovlivněné oblasti
- vznik „rybích ok“

Zdroj vodíku při tavném svařování, kterých je nutné se vyvarovat jsou: vlhkost obalu elektrod a tavidel, vlhkost na povrchu základního materiálu a přídavného materiálu, zbytky maziva po tažení ulpělé na povrchu přídavného materiálu – drátu, vč. drátu jádra elektrod, vodík absorbovaný při moření i poměďování povrchů drátu, zbytky po povrchových úpravách přídavných i základních materiálů ve vodních roztocích, vlhkost v ochranných plynech, obsah vodíku v základním materiálu, korozní produkty, barvy a mazadla na svařovacích plochách [7].

Hliník

Hliník působí silně desoxidačně a dentitřifikačně. Oxidy a nitridy hliníku působí jako krystalizační zárodky při tuhnutí oceli. Silně uklidněné oceli mají min. 0,02 hm.% hliníku [7].

Měď

Měď se do nelegovaných ocelí dostává používáním šrotu s určitým obsahem mědi. Obsah mědi do 0,26 hm.% se pokládá za neškodný. Při obsahu 0,15 až 0,50 hm.% mědi v oceli se snižuje rychlost koroze tím, že měď vytváří těsnou nepropustnou oxidickou vrstvu, která chrání výrobek před další atmosférickou korozi. Tohoto jevu je využito u konstrukčních ocelí odolných proti atmosférické korozi. Obchodní názvy těchto ocelí jsou „Corten“ a „Atmofix“ [7].

Nikl

Nikl dolegováváme do ocelí a svarových kovů pro zlepšení jejich plastických vlastností, zejména při nízkých teplotách a pro zvýšení jejich pevnosti. Nezpevňuje ocel ani substitučně ani intersticiálně. Ve vysokolegovaných Cr-Ni austenitických ocelích zajišťuje spolu s ostatními austenitotvornými prvky dosažení austenitické mikrostruktury [7].

Chrom, Molybden, Vanad

Cr, Mo, V jsou karbidotvorné prvky, které precipitací karbidů Cr_{23}C_6 , Cr_7C_3 , Mo_2C , V_4C_3 výrazně precipitačně zpevňují oceli i svarové kovy. Molybden, pokud je rozpuštěn v tuhém roztoku přispívá také k substitučnímu zpevnění materiálu. Vanad vytváří s dusíkem karbonitrid typu V (C,N) nebo nitrid vanadu VN, které zvyšují pevnostní vlastnosti ocelí a svarových kovů při vysokých teplotách a v oblasti tečení. S rostoucím obsahem Cr se také zvyšuje odolnost materiálu proti korozi.

Dolegování Ni, Cr, Mo a V do oceli nebo svarového kovu způsobí zvýšení požadovaných teplot předehřevu pro zabránění vzniku studených trhlin ve svarových spojkách [7].

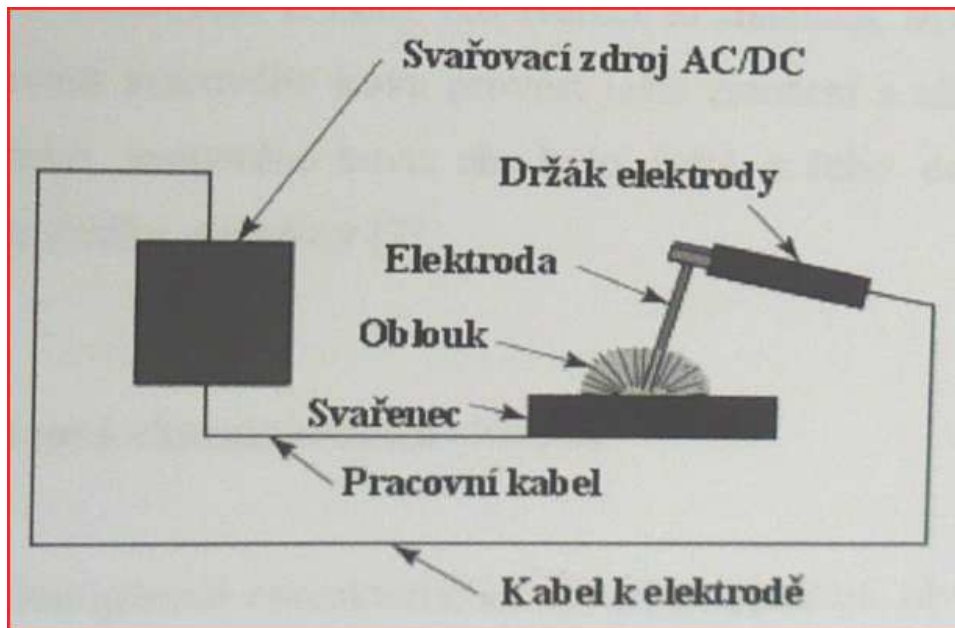
3.2 Metody pro svařování oceli P91

- metoda 111 (Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou), je stále nepoužívanější metodou používanou energetice,
- metoda 141 (Obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu), používá se pro stehování dílů a svařování kořene svaru,
- metoda 131 (Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu), používá se jako výplň svarových spojů,
- metoda 121 (Svařování pod tavidlem drátovou nebo plněnou elektrodou), používá se jako výplň svarů větších tloušťek.

3.2.1 Metoda 111 (Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou)

Nejstarší a nejvyžívanější metoda svařování. Svařování elektrickým obloukem obalenou elektrodou je jednoduchou metodou jak z hlediska nákladů tak parametrů svařování. Napětí na el. Oblouku nemusí svářeč nastavovat, jeho hodnota je dána statickou charakteristikou elektrického oblouku. Při vedení elektrického oblouku a elektrody je třeba postupovat tak, že elektroda je mírně skloněna proti svarové housence, aby roztavená struska nepředbíhala elektrický oblouk a nezpůsobovala struskové vměstky ve svarovém kovu. Délka elektrického oblouku má být přibližně rovna průměru jádra elektrody.

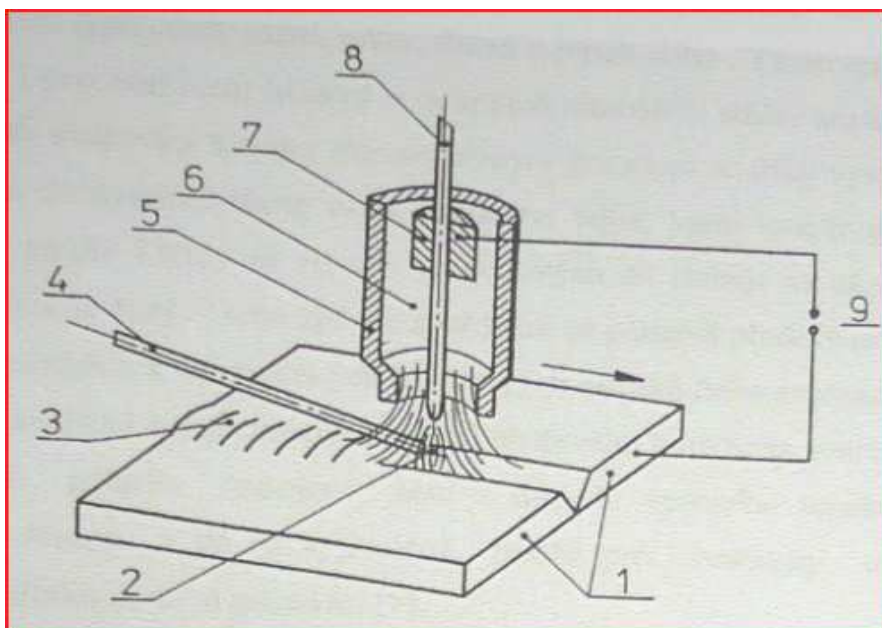
Zakončení svarové housenky musí být takovým prostupem, aby nedošlo ke vzniku staženiny v koncovém kráteru. Pro svářeče to znamená, že musí v koncovém kráteru při odtavení svarového kovu provést ještě zatočení s obloukem a odtavit ještě určité množství svarového kovu, aby bylo ještě z čeho dosazovat svarový kov a zabránit tak vzniku staženiny[1].



Obr. 2: Princip metody 111 [4]

3.2.2 Metoda 141 (Obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu)

V anglickém jazyce TIG (Tungsten Inert Gas). Při svařování hoří elektrický oblouk mezi netavící se elektrodou a základním materiálem. Ochranu elektrody i tavné lázně zajišťuje netečný plyn o vysoké čistotě. Převážně se používá argon nebo hélium.



Obr. 3: Princip metody 141 [1]

Svařování stejnosměrným proudem

Je to základní způsob zapojení metodou 141. Elektroda je připojena k zápornému polu zdroje a svařovaný materiál ke kladnému. Rozdělení tepla je odhadem 1/3 na elektrodu a 2/3 na materiál. Elektroda není tepelně přetěžována a lázeň má velkou hloubku.

Svařování střídavým proudem

Používá se z důvodu čistícího účinku. Elektroda je zapojena kladně. Svařování hliníku, hořčíku a jejich slitin. Vytvořením katodové skvrny na základním materiálu, ta je nestabilní a přesouvá se na místa pokrytá oxidy. Tyto místa mají nižší energii pro emisi elektronů a po zasažení katodovou skvrnou se oxidy snadněji odpaří.


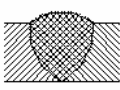
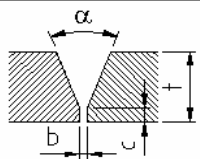
Svařování impulsním proudem

Nejnovější varianta tohoto svařování. Intenzita proudu se mění pravidelně s časem mezi dvěma proudovými hladinami a to základním proudem I_z a impulsním proudem I_p . Podle charakteru zdroje může být tvar průběhu impulsů proudu pravoúhlý, sinusový, lichoběžníkový nebo jiný. Impulsním proudem I_p v čase t dochází k natavení svarové lázně a

tím i přídavného materiálu. Průměrná hodnota svařovacího proudu je při impulsním svařování nižší než při klasickém způsobu svařování s konstantním proudem a proto vykazují svary malou TOO i výborné plastické vlastnosti včetně nižší náchylnosti na praskání a menší deformace.[1]

3.3 Tvary a rozměry svarových ploch

Tabulka č.3: Výběr z ČSN EN 29692 (05 0025)

Číslo	Tloušťka materiálu t	Pojmenování svaru	Značka podle ISO 2553	Zobrazení	Řez	Rozměry				Doporuč metody svařování
						Úhel α	Mezera b	Otupení c	Výška úkosu h	
1.5	$5 < t \leq 40$	Y-svar				$\alpha \approx 60^\circ$	$1 < b < 4$	$2 < c < 4$	—	111 131 135 141

Trubka 324 x 32, pro tuto součást volím rozměry svarových ploch:

$$\alpha = 60^\circ, b = 1, c = 2, t = 32$$

Přehřívák 38x5, pro tuto součást volím rozměry svarových ploch:

$$\alpha = 60^\circ, b = 1, c = 1, t = 5$$

3.4 Volba přídavného materiálu

Při výběru elektrody je na prvním místě kvalita svarového kovu. Ta musí být ekvivalentní nebo vyšší než základní materiál. Poloha svařování a typ svarového spoje, tloušťka svařovaného materiálu, způsob zatížení, vnější podmínky apod. jsou další faktory, které mají vliv na výběr vhodného přídavného materiálu [1].

Zásady při volbě přídavného materiálu

- chemické složení přídatných materiálů má být stejné nebo podobné jako základní materiál;
- pro dynamicky zatížené konstrukce z oceli je nutno volit přídatné materiály, svarový kov s lepšími mechanickými vlastnostmi než základní materiál;
- pro svařování materiálů s citlivostí na horké trhliny je nutno použít přídatné materiály snižující tuto praskavost;
- na svařování materiálu s vysokou odolností proti korozi je třeba použít přídatné materiály stejného chemického složení a stejné čistoty jako základní materiál;
- pro svařování nerezavějících ocelí stabilizovaných titanem je nutno použít přídatné materiály stabilizované niobem z důvodu nižšího propalu při průchodu elektrickým obloukem [1].

3.4.1 Přídatný materiál pro metodu 111

Vycházím z katalogu přídatných materiálů používaných v jaderné energetice. Firmy ESAB, OERLIKON a BÖHLER.

Tabulka č.4: Přídatné materiály pro metodu 111 [36], [37], [38]

Přídatné materiály dle (EN 1599/1600)		
ESAB	OERLIKON	BÖHLER
OK 76.98	X10 Cr Mo V Nb 9-1	E CrMo 9 B 42

Výrobce: OERLIKON

Označení: CROMOCORD-9M

Dle ČSN EN 1599: X10 Cr Mo V Nb 9-1

Tabulka č.5: Chemické složení CROMOCORD-9M [37]

Chemické složení CROMOCORD-9M					
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
0,13	0,44	1,14	8,77	0,14	0,98
Nb	V	Nb	Cu		
0,10	0,23	0,07	0,17		

Výrobce BÖHLER

Označení: E CrMo 9 B 42 dle (EN 1599/1600)

Tabulka č.6: Chemické složení E CrMo 9 B 42 [36]

Chemické složení E CrMo 9 B 42					
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
0,09	0,22	0,65	9,00	0,80	1,10
N	V	Nb			
0,04	0,20	0,05			

Výrobce ESAB

Označení: OK 76.98

OK 76.98 je bazická nízkovodíková elektroda pro svařování 9%Cr modifikovaných ocelí (P91/T91). Elektroda je vhodná pro svařování trubkových systémů, zařízení pracujících v oblasti vysokých teplot. Mechanické hodnoty jsou udány pro tepelné zpracování 750°C/2h.

Tabulka č.7: Chemické složení OK 76.98 [38]

Chemické složení OK 76.98					
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo

0,1	0,4	0,7	9,0	0,7	1,0
N	V	Nb			
0,05	0,2	0,06			

3.4.2 Přídavný materiál pro metodu 141

Netavící se elektrody používané při svařování metodou 141 se vyrábějí ze spékaného wolframu, který má teplotu tavení 3380°C, teplotu varu 5700°C, měrný elektrický odpor 5,36 .10-8 Ω a hustotu 19,1 g.cm-3. Elektrody se vyrábějí čisté bez příměsí o čistotě 99,9% W, nebo legované oxidy kovů – thoria (Th), lanthanu (La), ceru (Ce), zirkonu (Zr), nebo yttria (Y), které jsou v elektrodě rovnoměrně rozptýleny. Přísada oxidů zvyšuje životnost, zlepšuje se zapalování oblouku a jeho stabilitu díky zvýšené emisi elektronů [7].

Tabulka č.9: Přídavné materiály pro metodu 141 [36], [37], [38]

Přídavné materiály		
ESAB	OERLIKON	BÖHLER
OK Tigrod 13.38	Carborod KV7M	Thermanit MTS 3

Výrobce BÖHLER

Označení:Thermanit MTS 3

Tabulka č.10: Chemické složení Thermanit MTS 3 [36]

Chemické složení Themanit					
MTS 3					
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
0,09	0,15	0,43	9,20	0,75	1,0
N	V	Nb			
0,03	0,22	0,03			

Výrobce ESAB

Označení: OK Tigrod 13.38

(EN 1599/1600) 9Cr1Ni1Mo

OK Tigrod 13.38 je drát typu 9Cr1Ni1Mo pro WIG svařování ocelí pro vysokoteplotní aplikace např. při výrobě krakovacích a jiných zařízení v rafinériích. Především je používán pro 9% chromové oceli typu P91/T91. Jako ochranný plyn se používá čistý Ar. Mechanické vlastnosti jsou udány ve stavu po žíhání na odstranění pnutí.

Chemické složení přídatného materiálu:

Tabulka č.11: Chemické složení OK 76.98 [38]

Chemické složení OK 76.98					
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
0,1	0,2	0,8	8,7	0,6	1,0

Výrobce: OERLIKON

Označení: Carborod KV7M

Dle EN 21952-A: W CrMo91

Tabulka č.8: Chemické složení [37]

Chemické složení CITOFLUX H06					
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
0,09	0,20	0,50	9,00	0,60	0,90
N	V	Nb	S	P	
0,04	0,20	0,06	< 0,010	< 0,010	

3.5 Výpočet předehřevů

Ocel P91 byla vyvíjena pro použití v energetickém průmyslu pro výrobu potrubí a svařovaných kotlových součástí. Teplota předehřevu pro ocel P91 se uvádí v rozmezí 200 ÷ 300 °C v závislosti na tloušťce materiálu [10, 11, 12]. Závěry ze zkoušky praskavosti jsou uvedeny v literatuře [11], materiálu o tloušťce 60mm, svařeného metodou 111 (elektroda ø 4mm, svařovací proud 130A, svařovací napětí 23V). Z toho vyplívá náchylnost oceli P91 ke tvorbě studených trhlin v oblasti teplot 150 ÷ 200 °C. Literatura [11], doporučuje teplotu předehřevu 250 °C.

3.5.1 Výpočet teploty předehřevu podle Seferiana

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{C_p - 0,25} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.1)$$

kde: T_pteplota přehřevu

$$C_p = C_c + C_s \quad (3.2)$$

$$C_c = \frac{360.C + 40.(Mn + Cr) + 20.Ni + 28.Mo}{360} \quad (3.3)$$

$$C_s = 0,005.s.C_c \quad (3.4)$$

kde: stloušťka materiálu [mm]

[7]

3.5.2 Výpočet teploty přehřevu podle Ita a Bessya

$$T_p = 1440.P_w - 392 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.5)$$

kde: T_pteplota přehřevu

$$P_w = P_{cm} + \frac{H}{60} + \frac{K}{40.10^4} \quad (3.6)$$

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (3.7)$$

$$K = K_0.s \quad (3.8)$$

kde: stloušťka materiálu [mm]

K_0koeficient, pro tupý spoj $K_0=69$

Kintenzita tuhosti spoje

Hobsah difuzního vodíku, stanovený glycerinovou zkouškou [ml.100g⁻¹]

[7]

3.5.3 Výpočet teploty předehřevu podle ČSN EN 1011-2

Dle tabulky 8.4 v literatuře [7], je uvedena minimální teplotu předehřevu 200°C.

3.5.4 Porovnání předehřevů

V této části porovnávám výsledky teploty předehřevů dosažené dosazením do vzorců uvedených výše. Srovnání a volba vhodného předehřevu parovodní trubky a přehříváku jsou v tabulce.

Tabulka č.12: Porovnání předehřevů.

Výsledky předehřevů		
	Trubka 324x32	Přehřívák 38x5
dle Seferiana	365 °C	337 °C
dle Ita a Bessya	420 °C	390 °C
dle ČSN EN 1011-2	nad 200 °C	nad 200 °C
Volím teplotu předehřevu	250 °C	250 °C

4. Metodika ověřování vlastností svarových kovů

4.1 Nedestruktivní zkoušky svarových spojů

4.1.1 Vizuální prohlídka

Defektoskopické kontrole svarů má předcházet povrchová prohlídka zrakem nebo jednoduchými optickými přístroji. Ta má za cíl zjistit, vyhodnotit a posoudit povrchové makroskopické vady, tj. vady povrchu, jako jsou např. u svarů trhliny studené spoje, neprovařený kořen, povrchové vruby, krápníky a hubené svary. Vhodné je použít lupu umožňující cca 4-násobné zvětšení. Jedná se o základní kontrolu, rychlou levnou, která by měla z ekonomických důvodů předcházet všem způsobům nedestruktivní kontroly.

Vizuální prohlídky se často provádějí i v místech velmi těžko dostupných nebo když přístup ze zkoušené oblasti je úplně vyloučen a to prostřednictvím endoskopů, televizních kamer nebo jejich kombinace [6].

Podmínky vizuální kontroly jsou v ČSN EN 970.

4.1.2 Kapilární zkoušky

Kapilární metody nedestruktivního zkoušení jsou určeny pro zajišťování povrchových vad. Jsou založeny na využití kapilárních vlastností kapalin.

Při kontrole se na součást nanese speciální (pronikající) tekutina, tzv. penetrant, která vlivem kapilárních sil vyplní povrchové vady. Po odstranění přebytečné tekutiny s povrchu součásti (setřením, vysušením, apod.) se na zkoušený povrch nanese vývojka. Dochází k vztlínání detekční tekutiny z vad (kapilár) a k indikaci vady.

Indikační čáry (odpovídající přítomnosti vad) zobrazující se na povrchu vzorku mohou mít schopnost luminiscence v ultrafialovém záření nebo mají zbarvení absorbující (odrážející) část na ně dopadajících paprsků [6].

Kapilární zkoušky jsou dle ČSN EN 1289.

4.1.3 Magnetické a magnetoinduktivní zkoušky

Magnetické metody nedestruktivní kontroly jsou založeny na registraci rozptylových magnetických polí nad vadami. V důsledku přítomnosti povrchové vady se ve zmagnetovaném předmětu v oblasti této vady zvětšuje magnetický odpor, dochází k rozptylu

magnetického pole, které z části vystupuje do okolního prostředí, což lze využít ke zjištění vady.

Pro vlastní indikaci vad ve feromagnetických materiálech se nejčastěji používají tyto metody:

- prášková (polévací) metoda,
- magnetografická metoda,
- elektromagnetické snímání rozptylových polí
 - a)feromagnetickou sondou
 - b)Hallovou sondou

Nejrozšířenější a nejjednodušší metoda je zkouška prášková (polévací), podrobně specifikovaná v ČSN EN 1291. Je založena na zviditelnění rozptylových magnetických polí nad vadami pomocí feromagnetických částic. Při zkoušení se součást zmagnetizuje, současně se nanáší suspenze (feromagnetické částice rozptýlené ve vodě, minerálním oleji, petroleji apod.) a vyhodnocují se místa nahromadění feromagnetických částic, tj. místa výskytu vad. Snaha zvýšit citlivost magnetické polévací metody vedla k přípravě suspenze, obsahující barvivo, které pod ultrafialovým světlem silně fluoreskuje.

Polévací metoda dovoluje zjistit trhliny šířky cca 0,001 mm, např. velikost magnetického pole, množství magnetického prášku, složení polévací suspenze, eventuelně tloušťku nemagnetické krycí vrstvy na kontrolované součásti.

Magnetografická metoda spočívá v indikaci rozptylových magnetických polí nad vadami na magnetický pásek (obdoba magnetofonového pásku). Dochází k zmagnetování součásti, na které je přiložen magnetický pásek a na ten se kopírují eventuální rozptylová magnetická pole.

Při feromagnetickém snímání se používá sonda, která mění intenzitu magnetického pole na elektrický signál – tzv. Forstrova sonda. Jako indikátor magnetického pole se používá Hallova sonda, využívající Hallova efektu; protéká-li deskou zhotovenou z určitého polovodivého materiálu a vloženou do magnetického pole kolmo ke směru siločar konstantní budící proud, vznikne mezi okraji desky tzv.Hallovo napětí, umírněné magnetickému poli [6].

4.1.4 Ultrazvukové zkoušení svarů

Ultrazvukem lze zjišťovat vnitřní vady svarů. V současnosti je využívána hlavně impulsní odrazová metoda. Pomocí sondy (působící jako vysílač i přijímač) se do zkoušeného materiálu přivádí ultrazvukové vlnění, které se šíří materiálem. Při dopadu na rozhraní dvou prostředí (s rozdílnou akustickou impedancí) dochází k odrazu a registraci přijatého akustického tlaku v závislosti na čase. Vadu registrujeme na obrazovce defektoskopu ve tvaru tzv. poruchového echa, které je mezi počátečním a koncovým echem [14].

Zkoušku ultrazvukem řeší ČSN EN 1712 a ČSN ISO 9764.

4.1.5 Zkoušky prozařování

Prozařování je nejstarší a zároveň nejpoužívanější metodou nedestruktivního zkoušení materiálu. Materiál se prozařuje ionizujícím zářením, které má schopnost procházet hmotou. Používá se při rentgenovém záření a záření gama.

Pokud se jako zdroje ionizujícího záření používá technický rentgen, hovoříme o radiografii.

Princip metody spočívá v diferencovaném zeslabení záření vlivem vnitřních vad při průchodu hmotou. Záření procházející prozařovanou součástí exponuje zpravidla fotografický materiál.

Snímek, který získáme po expozici filmu, se nazývá radiogram. Pro ověření jakosti radiogramu používáme radiografické měrky (pokládané na prozařovaný materiál a prozařované spolu sním), které představují umělé vady známých rozměrů a dané geometrie.

Drátová měrka dle ČSN 01 5010 se skládá ze sedmi drátků odstupňovaných průměrů. Drátky i identifikační značky měrky jsou zalisovány mezi dvě tenké vrstvy z plastu nebo pryže vzdorující vodě a oleji a mající malou absorpci záření. Drátky jsou vždy z téhož kovu, pro jehož kontrolu je měrky určena.

Způsoby prozařování svarů jsou uvedeny v ČSN EN 1435. Nedestruktivní zkoušení svarů – radiografické zkoušení svarových spojů. V podstatě jsou rozděleny podle toho, zda záření prochází jednou nebo dvěma (i více) stěnami. Při snímkování musí být rovněž uvažována kontrola buď přímého nebo zakřiveného svaru.

Snímek se zpracovává ve vyvolávacím automatu nebo v temno komoře fotochemickou cestou a vyhodnocuje se na negatoskopu [6].

4.2 Destruktivní zkoušky svarových spojů

4.2.1 Podélná zkouška tahem

Je nejfrekventovanější mechanickou zkouškou kovových materiálů. Spočívá v postupném zatěžování zkušební tyče tahovým napětím, obvykle až do přetržení. K uskutečnění zkoušky je zapotřebí tyč a zkušební stroj, tzv. trhací stroj.

Každá zkušební tyč musí být označena tak, aby po jejím odběru bylo možno určit přesné místo ve zkušebním kusu, ze kterého byla odebrána.

Zkušební vzorky se musí odebrat podélně ze svarového spoje výrobku nebo ze zkušebního kusu. Po opracování musí být zkušební tyč ve zkoušené délce obsahovat pouze svarový kov [13].

Zkouška se provádí dle EN 876. Výsledky zkoušek musí odpovídat EN 10002-1. Za zvýšených teplot 10002-5.

Zjistíme hodnoty meze kluzu, meze pevnosti, tažnost a zúžení.

4.2.2 Zkouška rázem v ohybu

Umístění zkušebních tyčí, orientace vrubu a zkoušení řeší norma EN 875. Předmětem této normy je předepisování způsobu značení umístění zkušebních tyčí, orientaci jejich vrubu pro zkoušku a záznam výsledků zkoušek rázem v ohybu tupých svarových spojů do protokolu.

Tato norma platí pro zkoušky rázem v ohybu kovových materiálů všech druhů polotovarů, jejichž spojení bylo provedeno libovolnou metodou tavného svařování.

Zkouška rázem v ohybu musí být provedena podle EN 10045 – 1, která udává umístění, typ i rozměr zkušebních tyčí a orientace vrubu. Pro zkoušku rázem v ohybu umístíme vrub do osy svaru. Umístění vrubu může být upřesněno naleptáním makrostruktury svarového spoje.

Vrubová houževnatost je ovlivňována geometrií zkušební tyče, rychlosti rázu a teplotou. Nepříznivě působí také na vrubovou houževnatost přítomnost nehomogenit v materiálu – vnitřních vad bublin, vměstků, pórů apod. Touto zkouškou hodnotíme charakteristiku lomové plochy ve svarovém kovu a hodnotu nárazové práce.

Zkouška spočívá v přeražení zkušební tyče jedním rázem kyvadlového kladiva za podmínek stanovených dle EN 10045 – 1, přičemž zkušební tyč je podepřena na obou koncích [13].

4.2.3 Zkouška praskavosti TEKKEN

Jde o zkoušku založenou na dilataci svařovaných plechů. Používá se jako technologická zkouška při obloukových metodách svařování a při svařování pod tavidlem pro tloušťky plechů od 12 mm až do 150 mm. Zkouška se používá pro stanovení svařovacích parametrů pro kořenovou oblast tupých spojů. Nejčastěji trhliny vycházejí z přechodové oblasti TOO. Vyhodnocení se provádí metalograficky na příčném řezu.

4.2.4 Makroskopická kontrola svarových spojů

Kontrolní zkouška makrostruktury je založena na leptací technice. Leptací zkouška je v podstatě působení chemického činidla (leptacího roztoku) na povrch zkušební vzorku. Makrostrukturu zjišťujeme v nejhodněji voleném řezu vzhledem k toku materiálu při technologickém zpracování.

Únosnost svarového spoje a tím i provozní pevnost celé svařené součásti je dána nejen mechanickými hodnotami základního nebo přídavného materiálu, ale především charakteristikou vlastního svarového spojení, na níž mají zásadní vliv: Kvalita dosaženého kovového spojení, vlastnosti přechodové zóny, přítomnost vad ve svarovém spoji, velikost a charakter vnitřního pnutí.

Makrostrukturu zjišťujeme na vzorcích odebraných ze svařované oblasti tak, aby pokud možno zachycovaly celý svarový spoj včetně základního neovlivněného materiálu.

Hodnotíme obvykle plochu příčného řezu, kterou pro zkoušku upravujeme obroušením. Obraz struktury získáváme naleptáním. K tomu je možno použít řady uvedených

leptadel jako např. HCL, Fry, Rosenhain, atd. Leptáme dostatečně dlouho, aby se objevily rozšířili necelistvosti, tj. dutiny a trhliny, resp. Hrubé vměstky. Po dosažení dostatečného stupně naleptání leptání přerušíme a vzorek důkladně omyjeme a vysušíme.

Makrostrukturu hodnotíme z hledisek:

- Sledujeme kvalitu kovového spojení, to znamená, zda vůbec ke spojení došlo, nejde-li např. o studený spoj apod.
- Sledujeme charakter přechodové části ze svaru do základního materiálu a hodnotíme, zda je např. přechod ostrý, pozvolný.
- Hodnotíme přítomnost vad, tj. v první řadě trhlín, bublin a neprovařených míst [14].

4.2.5 Mikroskopická kontrola svarových spojů

Mikroskopický rozbor je důležitou částí každé zkoušky metalurgické svařitelnosti. Vlivem změny teploty se v přechodovém pásmu mění mikrostruktury. Svarový kov by měl mít vlastnosti základního materiálu, jeho struktura má být stejnorodá. Mezi svarovým kovem a základním materiálem by mělo být dokonalé kovové spojení. K odstranění nevýhodné struktury ve svaru se používá tepelné zpracování.

Mikrostrukturní rozbor svarů umožňuje:

- Podrobnější posouzení necelistvostí, zjištěných makrostrukturním rozbohem. Je možno rozlišit, zda necelistvost v místě svarového spoje je ředinou, pórem, nekovovým vměstkem apod.
- Podrobné určení struktury svarového kovu, přechodu i základního materiálu.
- Podrobné určení struktury po tepelném zpracování svarového spoje [14].

Makroskopická a mikroskopická kontrola se provádí dle ČSN EN 1321.

4.2.6 Zkouška tvrdosti dle Vickerse

Tvrdost materiálu je chápána jako odpor materiálu proti vniknutí cizího tělesa. Vyhodnocuje se obtisk trvalého vtisku, vniknutím čtyřbokého diamantového jehlanu do

kovového materiálu. Měříme úhlopříčku vtisku po odlehčení. Síla tlačení $F=9,8 - 980$ N do povrchu [13].

Zkouška se provádí dle ČSN 05 1313.

4.2.7 Creepová odolnost

Základní charakteristiky creepu modelovaných pásem TOO svarových spojů oceli P91 byly určovány za stacionárních podmínek creepu při konstantní teplotě a konstantním zatížení. Nebyl sledován vliv kolísání teploty a napětí, tepelné pnavy, korozního prostředí apod.

Zkoušky tečení do lomu jsou prováděny na stroji pro hromadné zkoušky. Vzorky jsou umístěny v topných komorách s možností individuálního nastavení teploty. V každé topné komoře může být umístěno v horizontální poloze až 15 zkušebních tyčí. Zatěžovací síla je vyvozována tlačnými pružinami a může být nastavena max. do výše 6kN, resp. 10kN. Pro zkoušky tečení do lomu se používá zkušebních tyčí průměru 6 až 8 mm.[35]

5. Závěr

Předmětem této bakalářské práce bylo charakterizovat ocel P91. V praktické části bylo za úkol navrhnout možné způsoby svařování oceli P91 pro energetické strojírenství. A navrhnout metodiku zkoušení svarových spojů.

V práci jsem navrhnul dvě metody svařování parovodní trubky a přehříváku. Pro každou metodu jsem doporučil přídatné materiály od tří výrobců. Přídatný materiál jsem volil podle chemického složení a podle doporučení výrobců. Dále jsem navrhnul úpravu a tvar svarových ploch pro tyto součásti. Samozřejmostí bylo vypočítat hodnotu teploty přehřevu podle tří autorů, vyhodnotit a zvolit teplotu přehřevu. Svařené součásti vyžadují kontrolu svaru, protože budou pracovat při tepelném zatížení a budou mechanicky namáhány. Za tímto účelem jsem navrhnul metodiku zkoušení svarových spojů s ohledem na namáhání.

Největším problémem, který vznikl při řešení této problematiky bylo najít vhodný přídatný materiál pro obě metody svařování. Chemické složení tohoto materiálu se musí co nejvíce přibližovat základnímu materiálu určenému ke svaření a mít co nejbližší hodnotu meze pevnosti při tečení jako základní materiál. Domnívám se, že při svaření těchto částí, bude dosaženo parametrů a kvality kladené na toto zařízení.

6. Použitá literatura

- [1] Purmenský, J., Sobotka, J.: Žárupevné oceli. In Sborník VŽKG, 1975.
- [2] Koukal, J., Schwarz, D.: Svařování ocelí pro energetiku. Zváranie/Svařování. 1998, roč. 47, č.6, s.131÷135.ISSN 0044-5525.
- [3] Meetham, G.W.: High Temperature Materials – The Overall View. In. Proc. od EUROMAT'89, col.1, 1989.
- [4] Dobrzański, J.: IV Konferencja – Stale dla energetyki. Opole 1985, z. 4.
- [5] Verner, R.: Svařování potrubí z vysokolegovaných CrMoV ocelí. DSSM, 2005, roč. II, č.5, str. 4÷5. ISSN 1214-7990.
- [6] Lagneborg, R., Bergman, B.: Met. Sci. J. 10/1976, p. 20.
- [7] Koukal, J., Zmydlený, T.: Svařování I. Ostrava, 2005
- [8] Meetham, G., W.: Proc. Int. Conf. EUROMAT, Aachen, vol. 1, 1989.
- [9] Vodárek, V., Kuboň, Z., Foldyna, V.: Mikrostrukturní stabilita modifikovaných (9÷12)% Cr ocelí, *Hutnické listy*. č. 4/1997, str. 31÷38. ISSN 0018-8069.
- [10] Kuboň, Z., Foldyna, V.: Steel research. No. 66, 1995, p. 389.
- [11] Hatterstrand, M., Andren, H.O.: Boron distribution in 9÷12 % chromium steels. *Materials Science and Engineering*. A270, 1999, p. 33.
- [12] Hornbogen, E., Baro, G.: Archiv. Eisenhutt, 44, 1973, p. 61.
- [13] Kaubach, K., Rukwied, A.: Proc. of Conf. HNS90'. Aachen, 1990.
- [14] Foldyna, V., Kuboň, Z., Jakobová, A.: Mat. Int Conf. FORUM 95, Krakov, 1995.
- [15] Valourec Ind. Rev.: The T91 Book 2. 1994.
- [16] Scarlin, R., B., Berger, C., Mayer, K., H.: Proc. *Int. Conf. Mater. For Advanced Power Eng. And other Appl.* Liege, 1994.
- [17] Orr, J., Buton, D., Rasche, C.: Sensitivity of microstructure and material properties of steel P91 to initial heat treatments, *Ironmaking and Steelmaking*. 20, 1993, p.415.
- [18] Strang, A., Vodárek, V.: Microstructural Stability Studies on a CrČel Resistant Martensitic 12CrMoVNb Power Plant Steel. In Proc. CrČel resistant Metaloid Materiále. Hradec nad Moravicí, 1996, p. 217.
- [19] Bruhl, F., Cerjak, H., schwaab, P., Weber, H.: *Steel Research*, 62, 1991, No. 2, p. 75÷82.

- [20] Hald, J.: TEM Investigation in New 9÷12 %Cr *Steels for High Temperature Application*, ELSAM ELKRAFT, The Technical University of Denmark 1988.
- [21] Sawaragi, Y., Usedá, A., Ogawa, K.: *Proc. Int. Conf. Mater. For Advanced Power Eng. And other Appl.* Liege, 1994.
- [22] Lundin, L., Falman, S., Andren, H., O.: Microstructure and mechanical properties of a 10% chromium steel with improved creep resistance at 600 °C. *Materials Science and Technology*, 1997, 13, p. 233.
- [23] Foldyna, V.: Crčel nízkolegovaných a modifikovaných chromových ocelí. *Technické aktuality Vítkovic*. Č.1, 1988.
- [24] Fujita, T.: *Mat. Int. Conf. FORUM 95'*. Krakov, 1995.
- [25] Thompson, R., C., Bhadesia, H., K., D., H.: Changes in chemical composition of carbides in 2.25Cr-1Mo power plant steel. *Materials Science and Technology*. 1994, 10, p.205.
- [26] Vodárek, V.: *Fyzikální metalurgie modifikovaných (9÷12) %Cr ocelí*. VŠB-TU Ostrava, 2003, 163s. ISBN 80-248-0329-1.
- [27] Hald, J., Strub, S.: Microstructural stability of 9÷12 %CrMo(W)VNbN steels. In *Proc. Materiále for advanced power engineering*. Liege, 1998, p. 155.
- [28] Pickering, F., B.: Historical development and microstructure of high chromium ferritic steels. In *Proc. Microstructural stability of crčel resistant alloys for high temperature applications*. IOM, London, 1997, P.1.
- [29] Foldyna, V.: Purmenský, J., Kuboň, Z.: Development of advanced chromium steels with respekt to microstructure and structural stability. *ISIJ International*. 40, 2000, Supplement.
- [30] Ennis, P.J, Quadakkers, W., J.: 9÷12 %Cr steels: application limits and potential for further development. *Proc. Parsons 2000*. In *Advanced materials for 21st century turbines and power plants*. IOM, London 2000, p. 265.
- [31] Quadakkers, W., J., Ennis, P., J.: The oxidation behaviour of ferritic and austenitic steels in simulated power plant service enviroment. In *Proc. Materials for advanced power engineering*. Liege 1998, p. 123.
- [32] Fujita, T.: Advances in 9÷12 %Cr heat resistant steels for power plants. In *Proc. of the 3rd EPRI conference of advances in materials technology for fossil power plants*. IOM, Swansea 2001, p.33.
- [33] Fujita, T.: Current progress in 9÷12 %Cr ferritic heat resistant steels. *Materials engineering in turbines and compressors*. IOM London 1995, p. 19.

- [34] Jochum, C., Heuser, H.: Properties of matching filler metals for welding P91, E911 an P92. In Proc. of the 10th international conference on creep and fracture of engineering materials and structures. Part Creep resistant materials, Teris 2002, Prague 2001, p. 137.
- [35] Sondel, M.: Studium vlastností modelovaných pásem TOO svarových spojů oceli P91, 96s, 2003.
- [36] Svařovací Materiály BÖHLER Welding, 24s.
- [37] Svařovací Materiály OERLIKON, 44s.
- [38] *Svařovací materiály ESAB*. Dostupné na WWW: <http://www.esab.cz/>